大規模センサネットワークのための Ant-based Routing アルゴリズムの高度化

宇谷 明秀*・織戸 英佑**・熊本 紋子**・山本 尚生*

An Advanced Ant-based Routing Algorithm for Large Scale Mobile Ad-Hoc Sensor Networks

Akihide UTANI*, Eisuke ORITO**, Ayako KUMAMOTO** and Hisao YAMAMOTO*

Wireless sensor networks (WSNs) have attracted significant interests of many researchers because they have great potential as a means of obtaining information of various environments remotely. WSNs have their wide range of applications, such as natural environmental monitoring in forest regions and environmental control in office buildings. In WSNs, many sensor nodes with such resource limitation as battery capacity, CPU, and communication capacity are deployed in a region and used to monitor and gather sensor information of environments. Therefore, scalable and efficient network control for saving energy consumption is needed to prolong the lifetime of WSNs. Ant-based algorithms have attracted attentions as routing algorithms for energy consumption savings because they are more robust, efficient, and scalable than other conventional routing algorithms. This paper proposes a new advanced ant-based routing algorithm for large scale WSNs, which is more efficient and scalable than conventional ant-based routing algorithms. We evaluate the proposed algorithm using computer simulations and verify its effectiveness.

Key Words: ant algorithms, mobile ad-hoc networks, dynamic routing, wireless sensor nodes

1. はじめに

モバイル環境下においてさまざまな通信サービス、ネットワークサービスが提供される時代になってきた。これらの中には従来のパブリックサービスとして、いわゆる公衆ネットワーク上で実現されるものだけでなく、特定の場所、範囲、限定された期間においてノード間でのデータ交換を求めるものも多い。ITSに総称される車々間通信、センサネットワークによる情報収集、災害時の非常時通信などである^{1)~3)}。これらに応えるネットワーク技術としてモバイルアドホックネットワーク(Mobile Ad-hoc NETWORKS; MANET)が期待されている。

MANETは地理的なノード密度、ノード間の接続関係、ノード間のトラフィックフローなどが動的に変化するネットワーク環境に対処するための自律分散型のアーキテクチャであり、その実用化に向けた研究が盛んに行われている。通信プロトコルの標準化も進展してきており、IETF MANET

WGでは、リアクティブ型プロトコルとしてAODVやDSR^{4),5)}、プロアクティブ型プロトコルとしてOLSRやTBRPF^{6),7)}を中心に議論が進められている。しかし、これらの通信プロトコルは経路の生成、維持、更新のための制御が複雑で、ネットワークを構成するノード(PDA, 携帯電話, 無線センサノードなど)のそれぞれに多くの通信処理機能の実行を要求する。とくに電源容量などのリソースに制約のあるセンサノードで構成され、かつ通信先が限定されることの多い無線センサネットワーク(Wireless Sensor Networks; WSN)においては、そのままでの利用は非効率的である。WSNにおいては、ノードの電源容量などの制約を考慮したデータ収集のためのクラスタリング手法^{8),9)}や同期型のデータ収集機構¹⁰⁾が提案されている。しかし、これらのクラスタリング手法は、ネットワーク全体のトポロジ情報が必要になるため、ネットワーク規模の拡大に対する拡張性、ネットワークトポロジの変化に対する適応性に欠ける。文献10)の同期型データ収集機構では、データ送信(転送)のタイミングを同期させ、データを集約して転送することで、各ノードのデータ転送回数を抑制することができる。しかし、同一データを複数のノードが中継してしまうという非効率な面がある。また、ネットワークトポロジが変化する場合は、変化に応じてデータ送信(転送)のタイミングを調整し直す必要があり、その間はデータ収集ノードにデータを送り届けることができない。

* 武蔵工業大学知識工学部 東京都世田谷区玉堤 1-28-1

** 武蔵工業大学大学院工学研究科 東京都世田谷区玉堤 1-28-1

* Faculty of Knowledge Engineering, Musashi Institute of Technology, 1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo

** Graduate School of Engineering, Musashi Institute of Technology, 1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo
(Received August 24, 2007)

(Revised January 15, 2008)

一方、ネットワークトポロジの変化や障害に対する頑健性、および通信形態(一对一、一对多、多対一、多対多)の変化に対する適応性を有する経路制御方式として、アリの採餌行動に基づく制御方式(Ant-based Routing algorithms; AR)が数多く提案され、その有効性検証が進められてきている^{11)~15)}。ARはアリが化学物質(フェロモン)によって巣と餌の間の経路を構築するプロセスを応用して、ノード間の経路制御を実現する方式である。一般に、経路制御に関するノード負荷が軽く、制御アルゴリズムも簡便であるため、WSNへの導入に対して本質的に優位であると考えられる。しかし、これら既往のARは大規模WSNの長期間運用を前提とした方式ではなく、ノード負荷も小さいとはいえない。

本研究では、文献16)のアリの採餌行動に基づく先進的な経路制御方式に注目した。これは電源容量などのリソースに制約のあるセンサノードで構成される大規模WSNを長期間運用することを目的とした経路制御方式であり、ネットワークトポロジの変化への対処も考慮されている。しかし、ノードの新規参入(追加)や移動によってトポロジが変化する場合への適応性に欠け、制御通信量(アリの周遊頻度)に関しても改善の余地があると考えられる。本論では、大規模WSNへの適用を前提とした新しい動的経路制御方式を提案する。この提案方式は制御通信量を抑制した上で、ノードの追加や移動によってネットワークトポロジが変化する場合への適応能力をも有する方式である。本論の構成は以下のとおりである。まず2章でWSNのための既往のARを概観し、それらの問題点を整理する。つぎに3章で提案方式を詳述し、既往の方式との比較を通して提案方式の優位性を整理する。4章ではシミュレーション実験の結果を紹介し、提案方式の有効性を示す。最後に5章で本論のまとめ、および今後の課題と展望を述べる。

2. 既往の Ant-based Routing Algorithms

2.1 基本方式とその問題点

アリの採餌行動に基づく経路制御方式の基本的な枠組みとして、Uniform Ant Algorithm(UAA)を挙げることができる¹⁷⁾。既往の研究^{11)~15)}ではその利用目的や利用環境に応じたさまざまな方式が提案されている。それらに対し、UAAは基本的な方式ではあるが、処理が簡便であるため、本論で対象とするWSNに対しては有用な枠組みである。

(1) UAA

各ノードは、Table 1のような経路テーブルを有し、確率的に中継先を選択する。Table 1の例では、ノード1, 2, 3と隣接したあるノードが、目的ノード(Destination Node; DN)1宛のデータを受信した場合に、55%の確率で次ノード(Next Hop; NH)1, 20%の確率でNH2, 25%の確率でNH3を中継先として選択し、選択したノードにデータを転送することを表わしている。目的ノードは、各ノードの経路テーブルを更新するため、ネットワーク内をランダムに移動する制御メッセージ(Control Messages; CM)を定期

Table 1 An example of UAA routing table

		Next Hop		
		NH1	NH2	NH3
Destination	DN1	0.55	0.20	0.25
	DN2	0.10	0.30	0.60

的に送出する。このCMには一定のTTL(Time To Live)が与えられ、この値はノードを経由するごとに1ずつ減じられる。TTLが0になったCMは廃棄される。

経路テーブルにおける次ノード候補 j へのデータ転送確率 p_j は次式で更新される。

$$\Delta p = \frac{k}{f(c)} \quad (k > 0) \quad (1)$$

$$p_j = \begin{cases} \frac{p_j + \Delta p}{1 + \Delta p}, & \text{if } j = i \quad (1 \leq j \leq n) \\ \frac{p_j}{1 + \Delta p}, & \text{if } j \neq i \quad (1 \leq j \leq n) \end{cases} \quad (2)$$

これは n 個の次ノード候補を持つあるノードが次ノード候補 i からのCMを受信した場合の確率更新式である。ここで k は学習率、 $f(c)$ はCMが通過した経路のコスト c に関する単調増加関数である。

(2) UAAの問題点

UAAはアリの採餌行動を基にした経路制御の基本的な方式であり改良の余地はあるが、あえてこのままの問題点を整理するとつぎようになる。

1) ネットワークトポロジの変化への適応性[Issue A]

大規模WSNでは、たとえば電源容量などのリソースに制約のある小型軽量で低機能な無線センサを観測エリアに大量に散布し、アドホックにネットワークを形成してセンシング情報を収集する。安価で低機能なノード群により構成されることが前提であるため、電力消費や故障に伴うノードの離脱、観測エリアへのノードの追加散布;適用環境(たとえば海流センシング)によってはノードの移動などを考慮に入れる必要がある。しかし、UAAでは、データ転送確率の更新を次ノード候補のメンバーを固定して行なうことになるので、ノードの離脱に関してはある程度機能する可能性はあるが、ノードの追加や移動によって新しい次ノード候補が参入してくる場合への適応は困難である。基本的には経路テーブルの更新は新たな次ノード候補群のもとで最初からやり直す必要がある。よって、次ノード候補群の構成が頻繁に変わる場合にはやり直しを繰り返すために経路制御の効率と精度は極端に低下する。

2) CMの周遊効率(ノードの転送処理負荷)[Issue B]

Issue B 1) 各ノードのある目的ノードに対する次ノード候補群のデータ転送確率は、その目的ノードから送出されたCMの到来によってのみ更新される。よって、CMの送出頻度が低い場合、それに応じて経路制御の精度も低下する。すべての目的ノードからの定期的なCMの到来を期待するには、頻繁なCMの送出とその長期間の周遊が前提となる。

Issue B 2) CMは(送出元の)目的ノードからの経路コス

トのみを情報として携帯する。その周遊過程で経由したノードに別のCMが残した低コストで効率的な経路情報があったとしても、その情報を共有することがない。

Issue B3) CMがネットワーク内を周遊する過程で、逆に送出元目的ノードに近づく方向へ移動してくる場合がある。この場合も経路テーブルの更新は実行されるため、あるノードではその次ノード候補群のうち、目的ノードから離れる方向のノードのデータ転送確率が更新され、近づく方向のノードのデータ転送確率が相対的に低下するという状況が発生する。

Issue B4) 確率の更新量は経路コストに依存しているため、目的ノードから遠くに位置するノードのデータ転送確率はCMが最短経路によって頻繁に到来していたとしてもほとんど変化しない。よって、周縁部での次ノード選択はランダムに行なっているに等しい状態になる。

このように、CMの周遊効率(や経路テーブルの更新)に問題があることから、ある程度の性能を実現するためには、多くのCMとその長期間の周遊が必要となる。各ノードにおけるCMの転送処理負荷が懸念される。周遊効率の向上によるCM処理回数の低減が期待される。

2.2 改良方式とその効果

文献16)ではUAAを基に、スケーラビリティがあり、ネットワークトポロジの変化にも対応できる制御方式として、以下の改良方式を提案している。本論では、この方式をModified UAA(MUAA)と呼ぶ。

(1) MUAA

MUAAは、UAAに対して以下の3つの改良(3方策)を加えた方式である。

1) TTLの多段階化

トポロジに変化のあるWSNにおいては、目的ノード近傍と比較して遠方のノードの経路精度はそれほど重要ではないとの判断に基づき、CMのTTLを一定ではなく多段階化する改善策を示した。TTLを多段階化することで、ネットワーク全体でのCM総処理数を同じにしつつ、TTLが長く長期間ネットワークにとどまるCMを減らし、目的ノードの近傍ノードのテーブルを更新するCMを増やすことができる。これにより、目的ノードの近傍ノードでは、ノードの離脱やそれによる通信状態の変化をより反映した経路テーブルができる。

2) CMの効率的な移動

UAAでは、目的ノードから送出されたCMは移動先をランダムに選択してネットワーク内を周遊する。周遊過程で目的ノードに近づく方向へCMが移動すると、逆に目的ノードから離れる方向へのデータ転送確率が高くなってしまふ。また、より少ないCMで遠方のノードの経路テーブルをも効果的に更新するためには、CMが目的ノードから離れる方向に移動する(効率よくネットワーク内に拡散する)ことが望ましい。この問題に対処するため、経路テーブルのデータ転送確率の高さを目的ノードへの近さと捉え、 n 個の次ノード

候補をもつノードに、次ノード i からCMが到来した場合の次ノード j にCMを転送する確率 p_{Cj} を(3)式で計算する方策を提案している。(3)式はデータ転送確率の逆数に基づくCMの移動確率計算であり、データ転送確率の低いノードほどCMの移動確率は高くなる。これにより、CMは周縁部に向かって拡散される可能性が増す。ここで、CMは直前の転送元ノード(ここでのノード i)と目的ノードには転送されない。

$$p_{Cj} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{p_k} - \frac{1}{p_i}} \quad (3)$$

3) データ転送確率更新式の変更

UAAにおけるデータ転送確率の更新量は経路コストの高さに反比例する。そのため、目的ノードから遠くに位置するノードのデータ転送確率は、CMが最短経路によって頻繁に到来していたとしても、それに応じた十分な更新が行なわれない。この問題に対処するための方策として、CMの経路コストの最小値 $c_{\min}$ を目的ノードごとに記録し、(1)式を

$$\Delta p = \frac{k}{f(c - c_{\min})} \quad (k > 0) \quad (1)'$$

として経路テーブルを更新する改善策を示した。

(2) MUAAの効果

MUAAの3方策がIssue A, Bの問題点を解決するに十分な方策であるかを整理する。まず、TTLを多段階化することで目的ノードの近傍ノードに対しては、ノードの離脱やそれによる通信状態の変化をより反映させることができる。しかし、これはノードの離脱への対処策であり、ノードの追加や移動への適応を考慮した方策ではない。また、目的ノードの近傍ノードでは頻繁にCMを処理することになるために転送処理負荷が増加し、その分電力消費による離脱を早める危険性がある。つぎに、CMの効率的な移動に関する方策はIssue B3を考慮した改善策であり、これには効果がある。しかし、Issue B1, B2のより本質的な周遊効率の問題点を解決するものではない。最後に、データ転送確率更新式の変更に関する方策はIssue B4に関してはその解決が図られている。

まとめると、CMの効率的な移動とデータ転送確率更新式の変更により、UAAと比較すれば改善の効果は期待できる。しかし、ネットワークトポロジの変化への対処は不十分であり、CMの周遊に関しても改善の余地がある。

3. 提案方式

本論では、2.1節の各Issueを考慮した新しい動的経路制御方式を提案する。提案方式において、周遊するCMが各ノードにもたらす情報は、既往の方式のようにある1つの目的ノードからの経路コストではない。CMはその周遊過程で、滞在した(転送元)ノードが有する各目的ノードへの接続評価値(中継先としての価値)のうちから最大のものを採取し、移動した先(転送先)のノードにこの最大値を伝える。

Table 2 An example of routing table of proposed algorithm

		Next Hop				
		NH1	NH2	NH3	NH4	NH5
Destination	DN1	50	0	($V_{13}=$)25	0	40
	DN2	0	50	30	10	0

CMを受信したノードでは、これにホップによる減衰率を乗じた値を経路テーブルに格納する。この単純な処理の繰り返しで経路テーブルは更新され、2.1節の各Issueは改善される。以下、まず提案方式を詳述し、続いて既往の方式(UAA, MUAA)に対する提案方式の優位性(期待される効果)を整理する。

3.1 提案方式における各ノードの経路テーブル

各ノードの経路テーブルは各目的ノード(DN*i*)と次ノード候補(NH*j*)、およびそれらのメトリクスとなる接続評価値 V_{ij} で構成される。要するに、各目的ノードへのデータ転送のために、次ノード候補には1つの接続評価値(この値はCMの周遊によってもたらされる)が与えられ、各ノードはそれらを保持する。

提案方式において、各ノードのこれらの接続評価値は時間経過に応じて

$$V_{ij}(t+1) = V_{ij}(t) \times \alpha \quad (0 < \alpha < 1) \quad (4)$$

によって一定の割合で減衰する。ここで t は時間ステップ、 α は時間経過に伴う減衰率である。この減衰は、CMの到来によって更新された接続評価値はノードのモビリティによって時間経過とともにその確信度が低下することを反映している。Table 2はノードが有する経路テーブルの例である。この例では、この時点でNH2, 4はDN1への接続評価値を有していない。よって、このノードからDN1へデータを転送する場合、NH1, 3, 5が中継先として選択されることになる。

なお、ノードがある1つの目的ノードDN*i*である場合、このノードは、自身から自身への中継ノードとしての価値をもつ。この「自身への価値」を VO_i とする。この値はCMの到来によって書き換えられることもなければ、減衰することなく常に一定値を保つ。ただし、この場合(目的ノードである場合)も、他の目的ノードに対しては中継ノードとしての役割が期待されるので、それらに対しての(Table 2と同様な)経路テーブルは保持する。

3.2 制御メッセージによる経路テーブルの更新

提案方式において、CMは特定の目的ノードと関連付けられていないので、CMを送出するノードを特定する必要はない。しかし、本論では既往の方式と枠組みをそろえるために目的ノードから送られるものとする。

ノード間を移動するCMによって、各ノードの接続評価値が更新される。各ノードでのCM処理手順を以下に示す。

Step 1) CM滞在中のあるノード l では(CMを転送する直前に)、経路テーブル内の接続評価値の中から目的ノードごとの最大値 $MV_i (= \max_j V_{ij})$ を検索し、この MV_i とノード

		Next Hop				
		NH1	NH2	NH3	NH4	NH5
Destination	DN1	0	30	50	100	60
	DN2	80	0	40	60	0

(a) node l routing table

Node ID	DN1	DN2
l	($MV_1=$) 100	($MV_2=$) 80

(b) Information carried by control message from node l to node m

		Next Hop				
		...	...	...	NH1	...
Destination	DN1	...	...	...	50	...
	DN2	...	...	...	40	...

(c) node m routing table**Fig. 1** An example on Step 1, 2 of proposed algorithm

ドID(l)からなるCMをランダムに選択した次ノードに転送する。

Step 2) このCMを受信したノード m では、この MV_i の値から、目的ノード i に対する次ノード l の接続評価値を

$$V_{il} = MV_i \times \beta \quad (0 < \beta < 1) \quad (5)$$

によって算出し、経路テーブルにこの V_{il} を格納する。ここで β はホップに伴う価値の減衰(ホップ依存の減衰)率である。具体的には経路テーブル内の次ノードNH1のフィールドを V_{il} の値で更新する(上書きする)。この更新によって、ノード m は各目的ノードへのデータ転送に対する次ノードNH1の最新の価値を獲得することになる。

CMの周遊過程で、各ノードは以上のStep 1, 2を繰り返しながら次ノード候補群の接続評価値を更新する。Fig. 1はStep 1, 2の処理手順をまとめた図である。図中の(a)はノード l の経路テーブル例であり、(b)はノード l から転送されたCMが保持している情報である。また、(c)はこのCMを受信したノード m の(更新後の)経路テーブル例である。なお、この例において、ホップによる価値の減衰率は $\beta=0.5$ である。

Step 1の処理を終えた後、移動した先のノード m がある1つの目的ノードであった場合は、CMによってもたらされた情報のうち、自身に関する MV_m を破棄し、残り(他の目的ノード)のものについてStep 2の処理を実行する。目的ノードに関してはそのノードが保持している自身への価値 VO_m の書き換え(更新)を行なわない。また、このノード m から次のノードへCMを転送する場合は、ノード m 以外の目的ノードに関してはStep 1の最大値 MV_i の検索処理を行なう。目的ノードである自身に関しては VO_m をこのノードの $MV_m (= VO_m)$ とする。これにより、各目的ノードが保持している自身への価値 VO_i が減衰しながら周囲のノードに伝播していく。目的ノードの近傍ノードは遠くに位置するノードよりも、より高い接続評価値を獲得することになる。

3.3 データ転送時の次ノード選択方式

センシングデータを転送する際の次ノード選択に関して、提案方式では以下の2通りの選択方式が考えられる。

方式1) 次ノード候補のうち最大接続評価値を有するノードを選択して転送する。なお、最大接続評価値を有するノードが複数存在する場合はその中からランダムに次ノードを選択する。

方式2) 各次ノードの中継先としての価値を、接続評価値を基に確率変換し、その確率に応じて次ノードを選択して転送する。

方式2の接続評価値を基にした確率への変換は

$$p_j = \frac{V_{ij}}{\sum_{k=1}^n V_{ik}} \quad (6)$$

によって行なえる。これは n 個の次ノード候補をもつあるノードが、データ転送時に次ノード j を選択する確率である。

どちらの方式を採用するかに関しては、ネットワークトポロジの変化、CMの周遊状況、各ノードの電力残量などを加味して決定することになる。

3.4 提案方式とその優位性

提案方式では、CMがノード間を移動する過程で、3.2節で述べた処理手順に基づいて各ノードの接続情報(目的ノードごとの次ノード候補の接続評価値 V_{ij})が更新されていく。各ノードではこれらの接続情報を時間経過に伴い減衰させながら保持する。このノード環境下で、各ノードは3.3節で述べた方式1, 2に基づいて、次ノードをノードバイノードに選択してデータを目的ノードまで転送する。

周遊させるCM数は方式設計上のパラメータである。CM数は多ければそれだけ性能が向上する可能性はあるが、その分制御通信量の増加によって各ノードでの転送処理負荷が増す。時間経過に伴う減衰率 α 、およびホップに伴う減衰率 β はネットワークトポロジの変化や各ノードの負荷状態などを加味して調整可能なパラメータである。 α はネットワークトポロジに変化がない場合(または変化しない間)は1でよい。各ノードの移動などに伴いトポロジが変化するような場合は、それに応じて接続評価値の確信度を低下させる必要がある。 β の設定値は、次ノード候補群の中での評価値の相対的な違いに影響を与える。大きく減衰させる(β を小さく目に設定すると2つの次ノード選択方式(方式1, 2)の差異がなくなる。次ノード候補群の中でのホップ数の差による評価値の差が大きくなり、確率に変換して次ノードを選択する方式2においても、大きな評価値を有する次ノードを選択する確率が際立って高くなるからである。この場合、方式2においては、より短い経路でデータを転送できる可能性はあるが、転送経路が固定化してしまい、特定のノードに転送処理負荷が集中してしまう危険性がある。WSNの利用目的や利用環境によって次ノード選択方式を使い分けるためには、 β をある程度大きく目に設定する必要がある。

以下に、提案方式の優位性(期待される効果)を2.1節で述べた問題点に沿って整理する。

1) トポロジ変化への適応性[Issue A]の改善

提案方式では次ノード候補の価値を接続評価値で判断する。

この接続評価値は、CMの周遊過程で目的ノードが有する自身への価値が減衰しながら周囲のノードに拡散した値である。データ転送時にはこの接続評価値を用いた2通りの次ノード選択方式(3.3節で述べた方式1, 2)が考えられる。アリの採餌行動(生物行動アルゴリズム)に基づく方式の利点が頑健性や柔軟性にあることを踏まえれば、確率に応じて次ノードを選択する方式(方式2)が望まれる。しかし、この確率はデータ転送時に必要なのであり、既往の方式(UAA, MUAA)のように、CMを受信するたびにその時点でのデータ転送確率を更新する(計算し直す)必要はない。また、既往の方式におけるこの確率更新は次ノード候補すべての相対的な価値の更新であるため、ノードの追加や移動による新しい次ノード候補の参入に伴って次ノード候補群に変化が生じた場合への適応性に欠ける。提案方式では次ノード候補群に変化が生じて、経路テーブルの更新を最初からやり直す必要がない。よって、やり直しを繰り返すことに起因する経路制御の効率低下や精度の悪化もない。提案方式のほうがネットワークトポロジの変化に対してより柔軟で汎用性のある方式であるといえる。

2) CM周遊効率(ノードの転送処理負荷)[Issue B]の改善

提案方式におけるCMはその周遊過程で各ノードの各目的ノードに対する MV_i を採取し、この値を移動先ノードに伝える。この MV_i は(過去において)別のCMによってもたらされた接続評価値をも含めた、各ノードにおけるCM処理時の最新の価値である。要するに、別のCM(送出元の目的ノードが異なってもよい)が残したより価値のある経路情報を共有して経路テーブルの更新を効率的に行なう。よって、既往の方式(UAA, MUAA)に比べ、少ないCM数、短いCM周遊期間で各目的ノードに対する効率的なデータ転送経路を構築できる可能性がある。Issue B1, B2 に対しての十分な対処が講じられているといえる。

提案方式はIssue B3, B4 に対する考慮もなされている。提案方式では、CMの周遊過程で既往の方式のような次ノード候補群内での相対的な価値の更新(次ノード候補すべての確率更新)を行なわない。よって、CMが目的ノードに近づく方向へ移動してくる場合の問題(Issue B3)は生じない。また、目的ノードから遠くに位置するノードの経路テーブルがほとんど更新されず、周縁部での次ノード選択がランダムに等しい状態になる(Issue B4)こともない。提案方式において周縁部のノードの接続評価値は、目的ノードの近傍ノードのそれよりは明らかに小さい値になるが、重要なのはその相対的な差異であるので、最新の評価値で書き換えられることにより、接続評価値は周縁部においても有効に更新される。データ転送時にはこの接続評価値に基づいて次ノード選択が適切に行なえる。

このように、CM周遊効率に改善が期待できることから、同等のデータ転送効率を期待する場合、周遊するCMの数

およびその周遊期間を減らせる可能性がある。各ノードでの転送処理負荷は軽減されるものと考えられる。

4. シミュレーション実験

既往の方式(UAA, MUAA)との比較を考慮して、以下の実験環境¹⁰⁾で提案方式の有効性検証を行なった。

4.1 シミュレーション設定

実験環境として、広範囲に設置された固定センサノードと低速で移動する自律ロボットから、その環境状態の情報(センシング情報)を収集する状況(大規模 WSN)を想定した。

シミュレーション設定を Table 3 に示す。ここで、表中の無線通信範囲(250 m)とは半径 250 m の単純な円領域を表わし、実験領域内のノード群(1024 ノード)の初期配置はランダムとした。Fig. 2 はそのネットワーク構成図である。本実験ではこの領域の角にベースステーション(これを目的ノードとする)を配置し、無線リンクで構成されたネットワークによって、各ノードから各目的ノードにデータを送信する状況を想定した。

4.2 評価に用いた指標とその定義

評価に用いた指標(とその定義)を以下に示す。

(1) 平均ホップ数比と全平均ホップ数比

各ノードから目的ノードへのデータ転送に要した実際のホップ数を、各ノードから目的ノードへの理想的な最短ホップ数で割った値をホップ数比とする。平均ホップ数比とは理想的な最短ホップ数が等しいノードごとのホップ数比の平均であり、全平均ホップ数比とは全ノードのホップ数比の平均である。これにより、データがどの程度のホップ数で目的ノードに到達しているかがわかり、各方式の CM 周遊効率(データの転送効率)が評価できる。なお、この評価では、ノード密度が十分に高い状態で、データ送信に関して TTL を設定せずに、目的ノードに到達するまで各ノードは転送を

続ける。よって、目的ノードへのデータ到達率は 100% である。

(2) 平均消費電力

各ノードの総消費電力量を、目的ノードへの理想的な最短ホップ数が等しいノードごとに平均した値を平均消費電力とする。これにより、目的ノードからの距離に対するノードの実際の消費電力量がわかり、各方式のノード負荷が評価できる。

(3) 全平均到達率

全ノードから目的ノードへのデータ送信に関し、設定した TTL 以内に目的ノードまで転送できた割合を全平均到達率とする。ここで、ノードの移動によりリンク切断が生じている場合、再送は行なわず、到達失敗として評価するものとした。これにより、ネットワークトポロジの変化への適応性を評価する。

なお、これらの評価(1)~(3)では同条件で 50 回のシミュレーションを実施した際の平均を用いている。

4.3 シミュレーション結果および考察

シミュレーションに際し、既往の方式(UAA, MUAA)における関数およびパラメータは、 $f(c)=0.1 \times c$ (各リンクのコスト 1)、 $k=0.1$ とした。既往の 2 方式ではこの単調増加関数や学習率の設定がデータ転送確率の更新量に影響を与える。本実験では既往の研究で用いられ¹⁰⁾、しかも事前の調査で良好な結果であった上記の設定(値)を採用した。

提案方式のパラメータ設定は以下のとおりである。本実験では固定センサノードと低速で移動する自律ロボットで構成される WSN を想定としていることを反映して、移動ノードの時間減衰率は $\alpha=0.9$ 、固定ノードは $\alpha=1$ とした。ホップに伴う減衰率は、次ノード選択方式(方式 1, 2)の比較を行なうことを考慮して(両方式の違いを確保するために) $\beta=0.5$ とした。また、各目的ノードが有する自身への価値 VO_i はその設定値が結果に影響を与えることはないが、本実験では 100 とした。

(1) ネットワークトポロジに変化がない場合

まず自律移動ロボットを導入せずに、全 1024 ノードが固定センサのみで構成された WSN を用いて、領域の環境状態を監視する状況を想定した。本実験ではトポロジに変化がない(ノードの離脱や追加散布がない)ものとして、既往の方式(UAA, MUAA)と提案方式を比較した。

1) 目的ノードが 1ヶ所の場合

目的ノードが DN1 のみの場合の結果を示す。実験領域内に配置したノードの DN1 への最短ホップ数の最大値は 32 であった。

Fig. 3 は CM 総ホップ数に対する全平均ホップ数比を表わしている。図中の Method 1, 2 は提案方式におけるデータ転送時の次ノード選択方式(方式 1, 2)を指す。ここで、CM 総ホップ数(Total hop number of control messages)とは、たとえば 10000 の場合、DN1 から計 20 の CM (TTL 500) が順に送出され、経由したノードの経路テーブルの更新が完了した状態を指し、20000 の場合、計 40 の CM による同様の経路テーブル更新完了状態を指す。ただ

Table 3 Condition of the simulations

Simulation size	4550 m × 4550 m
The number of nodes	1024
The range of radio wave	250 m
The number of destination nodes	1 or 2

Fig. 2 Simulation topology

し、TTLが多段階化されているMUAAでは、総ホップ数10000の場合、DN1から計1024のCMが送出されている¹⁶⁾。この結果はネットワーク全体でのCM総処理数に対する全平均ホップ数比であり、マクロな視点でのデータ転送効率に関する評価結果である。UAAと比較して、MUAAの結果は大幅に改善している(より少ないCMの処理で効率的なデータ転送を実現している)。提案方式では(方式1, 2ともに)さらに性能が向上している。とくに、CM総ホップ数が10000以下の場合に顕著な差異が確認できる。これは提案方式における経路情報共有の効果である。CMの周遊効率向上により、ネットワーク全体でのCMの処理数が少なくても、ある程度の性能が実現できることを表わしている。電源容量などに制約のあるノードから構成される大規模WSNの場合、この効果は重要である。

Fig. 4はCM総ホップ数10000時における平均ホップ数比である。MUAAに比べ、提案方式ではDN1から遠くに位置するノードのデータ転送効率は大きく改善しているが、提案方式の方式2の場合、DN1近傍ノードに関しては劣っている。これはTTLの多段階化によって、MUAAではDN1近傍ノードの経路テーブルが頻繁に更新されているからである。しかし、その代償として、MUAAはDN1近傍ノードに過度な負荷(CM転送処理負荷)を与えていると考えられる。遠方ノードにとって、近傍ノードは目的ノードへのデータ転送に対する大切な中継先である。近傍ノードの離脱(電力切れ)が早まれば、それだけ遠方ノードとのリンク切れも早まることになる。

Fig. 5は同じくCM総ホップ数10000時における平均消費電力である。これはCMの転送処理と全1024ノードから送信されたデータの転送処理が完了し終えた状態での各ノードの総消費電力量に基づく平均消費電力であり、MUAAと提案方式(方式1, 2)の比較結果である(UAAに対するMUAAの優位性は明らかであるため、既往の方式としてはMUAAの結果のみを示す)。本実験では、CMサイズは6[バイト]、(センシング)データサイズは12[バイト]とし^{18),19)}、消費電力量の算出は文献8)に基づいている。提案方式は実際の消費電力(ノード処理負荷)においても明らかに効率的である。MUAAは提案方式(方式2)と比較して、

DN1近傍ノードのデータ転送効率は優れている(Fig. 4)が、前述のとおり、近傍ノードにはCM転送に関する過度な負荷が加わるため、結果として全領域で提案方式(方式2)より多くの電力を消費している。提案方式の優位性が示されている。

最後に、次ノード選択方式の違いに着目すると、本実験の場合、方式1のほうが効率的な経路でデータを転送できている。ネットワークトポロジに変化がない場合、データ転送効率の観点からは方式1が有効である。しかし、ネットワークの構成によっては転送経路が固定化してしまうため、ある特定のノードに転送処理負荷が集中してしまう可能性がある。Fig. 5からわかるように、実際の消費電力においては方式1, 2に平均ホップ数比の結果(Fig. 4)ほどの差がない。この結果はノードの負荷分散の観点からの方式2の優位な特性を示していると考えられる。負荷分散に関する詳細な評価、および各ノードの負荷を考慮した次ノード選択方式の確立は今後の課題である。

2) 目的ノードが2ヶ所の場合

目的ノードが2ヶ所の結果を示す。ノード配置は上記1)と同じである。DN2への最短ホップ数の最大値は33であった。UAAに対するMUAAの優位性は目的ノードが1ヶ所の場合と同じであったので、ここではMUAAのみを示す。

Fig. 6はCM総ホップ数に対する全平均ホップ数比であり、Fig. 3と同様にマクロな視点での評価結果である。この実験では、CMはDN1, DN2, それぞれから送出されている。よってCM総ホップ数30000ではDN1, DN2, それぞれからのCM総ホップ数は15000となる。また、Fig. 6における全平均ホップ数比とはDN1, DN2ごとの全平均ホップ数比を平均した値である。Fig. 6とFig. 3の結果を比較すると、MUAAではCM間の経路情報共有が行なわれないため、同じCM総ホップ数で対比すると(実際にはDN1からはその半分)、結果は大幅に悪化している。これに対して提案方式では、Fig. 3の結果と比較して若干ではあるが性能が向上している。目的ノードを2ヶ所設置した場合のほうが1ヶ所の場合よりもCM周遊効率の差は大きい。提案方式では送出元の目的ノードが異なるCM間でも経路情報を共有しながら各ノードの経路テーブルを更新していくため、既往の方式と比較して目的ノードが複数設置されている場合は

Fig. 3 Total average hop ratio

Fig. 4 Average hop ratio vs. distance

Fig. 5 Average energy consumption vs. distance

1つの場合より性能改善はより顕著となる。大規模 WSN の実際の利用場面においても、目的ノードは複数設置されることが想定される。この結果は提案方式のさらなる優位性、汎用性を示している。

Fig. 7(a), (b)はDN1, DN2, それぞれからのCM 総ホップ数が10000のときの平均ホップ数比である。この結果でも Fig. 4 との比較を通して、提案方式の経路情報共有によるCM 周遊効率の向上とそれによるデータ転送効率の改善が見て取れる。しかし、提案方式においても、目的ノードから遠くに位置するノードのデータ転送効率は低下する傾向にある(とくに方式1で顕著である)。現段階ではCM をランダムにネットワーク内を移動させているが、CM の周遊(法)には改善の余地がある。

(2) ネットワークトポロジが変化する場合

つぎに、ネットワークトポロジが変化する場合(ノード群に自律移動ロボットが含まれている)場合の結果を示す。2章でも述べたように既往の方式はトポロジが変化する場合への適応性に欠ける。中でもノードの追加や移動によって次ノード候補群が変化する場合への適用は困難である。しかし、大規模 WSN の利用場面を考慮すると、トポロジ変化への適応能力は必要不可欠であり、適応能力があればそれだけ応用範囲は広がる。本実験では、災害領域に投入された数多くの固定センサノードと限られた数(全ノード中の1割程度)の自律移動ロボットで領域内の環境状態を監視する状況を想定して、ロボットの移動によって次ノード候補群が変化する場合の提案方式の適応性を検証した。検証に際しては目的ノードを1ヶ所(DN1)とし、複数ヶ所の場合と比較してより経路維持が困難と考えられる状況で実験を行なった。

各自律移動ロボットには、固有の目的(タスク)が与えられていることを想定する。各ロボットは与えられたタスクを達成するために固有のタスク(達成)ポイントまで移動しタスクを処理する。本実験において、各ロボットはこのサイクル(移動と処理)を繰り返すものとする。また、これらの自律移動ロボット(群)はタスク処理の間も含め、他の固定センサノードと同様に機能する、すなわちセンシング(観測)と目的ノードへのデータ送信(および転送)は行なうものとする。これらの前提に基づいて、各ロボットの移動モデルには

(MANET)通信プロトコルの評価で一般に用いられている Random Way Point モデルを採用した。各ロボットは領域内に移動ポイントを設定して、最大1m/秒の速度で移動する。ここで、実際の移動速度はロボットの適用環境を考慮して、毎秒0.1m~1mの間(0.1m刻み)でランダムとした(結果的に一様分布に従うような速度を設定した)。各移動ポイントでの停止時間は、より変化の大きい環境での評価を行なうために0とした。

Fig. 8は全ノード(1024ノード)の中に含まれる自律移動ロボットの割合に対する全平均到達率であり、データ転送に伴うTTLを200とした場合のCM 総ホップ数10000時の結果である。ここで、全ノードにおける自律移動ロボットの分布はランダムである(指定の数だけランダムに自律移動ロボットとした)。また、DN1からのCM 送出数は20であり、CM 送出完了後のネットワーク全体でのCM 処理数は毎秒200である。本実験におけるノード数は1024である。よって、この結果において各ノードは約5秒に1回経路テーブルを更新(CM を処理)していることになる。結果を確認すると、自律移動ロボットが10%(約100ノード)の場合、90%以上の高い到達率を実現している(全ノードが自律移動ロボットで構成されたとした場合でも、70%弱の到達率は維持できている)。現実投入できるロボット台数には限界があり、実際には限られたロボットで複数のタスクを処理する状況が想定される。提案方式は散布された固定センサノードの偏り(偏在)で、目的ノードへのデータ転送が困難な状況において、別の使用目的のために投入された(限られた数の)自律移動ロボットとも協調して適用領域の状態を監視するような場合に有効である。

Fig. 9は上記(Fig. 8)と同様の条件下でのTTLに対する(CM 総ホップ数10000時の)全平均到達率であり、Fig. 10はTTL200におけるCM 送出数に対する全平均到達率である。ここで、各ノードでのCM 処理頻度は上記(Fig. 8)と同じである。よって、CM 送出数50における(CM 送出完了後の)ネットワーク全体でのCM 処理数は毎秒500である。なお、図中の10%、100%は全ノード中の自律移動ロボットの割合を表わす(ロボットの割合が1割の場合とすべてがロボットの場合の結果が示してある)。Fig. 9からは、

Fig. 6 Total average hop ratio

(a) DN1

(b) DN2

Fig. 7 Average hop ratio vs. distance

Fig. 8 Total average connectivity on the ratio of robots

Fig. 9 Total average connectivity on TTL

Fig. 10 Total average connectivity on the number of control messages

TTL 200 以上の結果に差異がないことが確認できる。ネットワークトポロジに変化がない場合の遠方ノードの経路長(ホップ数)が130~190程度(最短ホップ数の最大値が32でその平均ホップ数比が方式1で4, 方式2で6弱)であったことを考慮すると, 自律移動ロボットの割合が1割程度の場合には, データ転送効率に極端な低下は生じていない。一方, 全ノードを自律移動ロボットとした場合は, 到達率80%を実現するために, 約50のCMが必要となる(Fig. 10)。これは各ノードにおいて約2秒に1回経路テーブルを更新する場合に相当する。次ノード候補群の構成が頻繁に変化する場合, そのことを経路テーブルに反映させるために, より多くのCMが必要となる。しかし, 想定した(WSNの)利用環境において自律移動ロボットの割合は1割程度である。提案方式は想定した利用環境で十分に機能し得ると考えられる。

つぎに, 2通りの次ノード選択方式に着目すると, TTLを短く設定した場合は, 方式1のほうがよい結果であるが, TTL 200 以上の場合は両方式に大きな差異がない。方式1は次ノード候補のうち必ず接続評価値が最大のノードを中継先として選択するため, ノードの移動によるリンク切れのリスクが高い。一方, 方式2ではデータ転送確率によって次ノードを選択するため, リンク切れのリスクは低下し, 各ノードの負荷分散の観点からも効果が期待できる。しかし, その分設定したTTL以内に転送が完了しないケースが増える。ノードの移動特性に応じた次ノード選択方式の確立は今後の課題である。

最後に, 既往のMANET通信プロトコルに対する提案方式の優位性, 特徴を述べる。本実験ではCM周遊の効果(経路構築性能)を明らかにするために, 全ノードからのデータ到達率を評価した。しかし, 本実験で想定した利用環境では, 多くのセンサノードで領域を監視し, 実際に異常値を計測した特定のノードのみが定期的にその状態情報(センシングデータ)を送信して, 目的ノードへ異常を知らせるといった利用方法が考えられる。この際, 一般的な通信プロトコル(経路制御法)を使用すると, フラディングによる最短経路構築のために全1024ノードが制御パケットを送受信することになる。データ送信(収集)の間隔を2秒とし¹⁰⁾, そのたびに

フラディングによる経路構築を行なうことを想定した場合, 各センサノードに与える負荷は大きい。また, 一般に最短経路を使ったデータ転送となるため, 特定のノードに転送負荷が集中してしまい, 負荷集中ノードの(電力消費による)早期の離脱を招きかねない。それに対して, 提案方式では移動ノード(自律移動ロボット)が1割の場合, 各ノードは約5秒に1回のCM処理で, 90%以上の高い到達率を実現できる。到達率100%ではないが, データ送信頻度を若干調整することで, 目的ノードにおいて十分なデータ収集が可能である。また, 提案方式では(とくに方式2においては), データを最短経路で転送するわけではない。経路長は最短の場合と比べて, 全ノードの平均で1.5倍(方式1), 3.9倍(方式2)程度にはなるが, 複数の経路を使ったデータ転送が実現できるため, ノード処理負荷は分散され, WSNの長期間運用の観点からは有効である。

5. まとめ

本論では, 電源容量などのリソースに制約のあるノード群によって構成される大規模センサネットワークへの適用を前提とした新しい動的経路制御方式を提案した。提案方式はノードが移動する場合への拡張性をも考慮に入れた経路テーブルの新しい更新法(揮発性の接続評価値構成法)であり, シミュレーション実験を通して, 制御メッセージの周遊効率(データの転送効率)の観点からその有効性を確認した。

実験では, まず, ネットワークトポロジが変化しない場合において, 既往の方式と比較し, 提案方式の優位性を実証した。つぎに, ネットワークトポロジが変化する場合(ノードが移動する場合)において, 提案方式の適応能力を示した。

提案方式において, 制御メッセージは経路情報を共有しながら, 各ノードの経路テーブルをプロアクティブに更新する。よって, 既往のAnt-based Routing algorithmsのように, 制御メッセージを送出するノードを特定する(目的ノードからの送出に限定する)必要がない。本論では, 既往の方式と条件をそろえて(主に経路制御の効率性を比較するために), 制御メッセージ送出ノードを目的ノードに限定したが, 提案方式にはさらなる拡張性, 発展性を期待することができる。たとえば移動ノードや追加散布されたノードが経路を確

認するための制御メッセージを送出して自身の周囲の経路情報のみを更新(局所修復)したり, 通信形態の変化に応じて適応的に制御メッセージを用いたりすることが容易に行なえる。リアクティブ処理との結合も容易であり, ハイブリッド型の動的経路制御方式として今後のさらなる進展が期待できる。今後は

- 1) 各ノードの負荷分散の観点からの評価, およびノード消滅時, 追加時の過渡状態および定常状態における経路構築性能の総合的な評価
- 2) 動作開始に緊急を要する, あるいは不稼働時間の許されないアプリケーションにおける良好な経路構築状態に達するまでに要する時間の評価
- 3) パラメータ(減衰率 α , β)の自律的な調整機能の導入
- 4) 各ノードの電力残量や移動特性, さらに目的ノードの配置や個数などに対応した制御メッセージ周遊法, およびデータ転送時の次ノード選択法の確立
- 5) ハイブリッド型の動的経路制御方式として拡張する上でのリアクティブな経路探索法の構築

などの課題に取り組んでいく予定である。

参 考 文 献

- 1) 間瀬, 中野, 仙石, 篠田: アドホックネットワーク, 電子情報通信学会誌, **84**-2, 127/134 (2001)
- 2) 田村, 戸辺: マルチホップ無線センサネットワーク, 人工知能学会誌, **19**-4, 441/446 (2004)
- 3) 川端邦明: レスキュー用知的データキャリアを用いた被災者探索システムの構築, 電子情報通信学会, 第5回アドホックネットワーク・ワークショップ, 3-1/3-8 (2006)
- 4) C. E. Perkins and E. M. Royer: Ad hoc on-demand distance vector routing, Proc. 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 90/100 (1999)
- 5) D. B. Johnson, D. A. Maltz, Y. C. Hu and J. G. Jetcheva: The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks, IETF Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-09. txt (2003)
- 6) T. Clausen and P. Jaquet: Optimized link state routing protocol, Request for Comments 3626 (2003)
- 7) R. Ogier, M. Lewis and F. Templin: Topology dissemination based on reverse-path forwarding (TBRPF), IETF Internet Draft, draft-ietf-manet-tbrpf-10. txt (2003)
- 8) W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan: Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, Proc. of the Hawaii International Conference on System Sciences, 3005/3014 (2000)
- 9) K. Dasgupta, K. Kalpakis and P. Namjoshi: An efficient clustering-based heuristic for data gathering and aggregation in sensor networks, Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 16/20 (2003)
- 10) N. Wakamiya and M. Murata: Synchronization-based data gathering scheme for sensor networks, IEICE Trans. Commun., **E88-B**-3, 873/881 (2005)
- 11) S. Marwaha, C. K. Tham and D. Srinivasan: A novel routing protocol using mobile agents and reactive route discovery for ad hoc wireless networks, Proc. IEEE International Conference on Networks, 311/316 (2002)
- 12) I. Kassabalidis, M. El-Sharkawi, R. II, P. Arabashahi and A. Gray: Adaptive-SDR: Adaptive swarm-based distributed routing, Proc. IEEE World Congress on Computational Intelligence, 2878/2883 (2002)

- 13) J. S. Baras and H. Mehta: A probabilistic emergent routing algorithm for mobile ad hoc networks, Proc. Workshop on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (2003)
- 14) M. Heissenbüttel and T. Braun: Ants-based routing in large scale mobile ad-hoc networks, Proc. Kommunikation in verteilten Systemen, 91/99 (2003)
- 15) G. D. Caro, F. Ducatelle and L. M. Gambardella: AntHoc-Net: An ant-based hybrid routing algorithm for mobile ad hoc networks, Proc. 8th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, 461/470 (2004)
- 16) Y. Ohtaki, N. Wakamiya, M. Murata and M. Imase: Scalable and efficient ant-based routing algorithm for ad-hoc networks, IEICE Trans. Commun., **E89-B**-4, 1231/1238 (2006)
- 17) D. Subramanian, P. Druschel and J. Chen: Ants and reinforcement learning: A case study in routing in dynamic networks, Technical Report TR96-259, Rice University (1998)
- 18) 大島, 織戸, 宇谷, 山本: 揮発性の接続評価値に基づくセンサ端末の負荷分散を考慮したセンシング情報収集機構, 電子情報通信学会, 信学技法, **107**-393, 69/74 (2007)
- 19) 若林, 多田, 若宮, 村田, 今瀬: 生物に着想を得たセンサネットワークのための適応的な通信機構の提案と評価, 電子情報通信学会, 信学技法, **107**-294, 89/94 (2007)

[著 者 紹 介]

宇 谷 明 秀 (正会員)

1995年日本大学大学院博士後期課程修了。博士(工学)。同年武蔵工業大学工学部助手。現在, 同大学知識工学部准教授。主として, 動的ネットワークの経路制御, 自律分散システムに関する研究に従事。電子情報通信学会, 情報処理学会, 人工知能学会会員。

織 戸 英 佑

2007年武蔵工業大学工学部システム情報工学科卒。同年同大学大学院工学研究科博士前期課程入学, 現在に至る。主として, 動的ネットワークの経路制御に関する研究に従事。

熊 本 紋 子

2007年武蔵工業大学工学部システム情報工学科卒。同年同大学大学院工学研究科博士前期課程入学, 現在に至る。主として, 動的ネットワークの経路制御に関する研究に従事。

山 本 尚 生

1974年慶応義塾大学大学院修士(電気工学専攻)課程修了。同年電電公社(現 NTT)入社。武蔵野電気通信研究所にて光交換方式, 通信網制御方式, ダイナミックルーティング方式などの研究開発に従事。現在, 武蔵工業大学知識工学部教授。工博(慶大)。電子情報通信学会(正員, フェロー), 日本OR学会会員(第15回事例研究奨励賞ソフトウェア部門賞受賞), IEEE(SM)。